

**ОСНОВЫ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ТРУБ ПАРОВЫХ КОТЛОВ**Юдин В.А.

Научные руководители: Любимова Л.Л., к.т.н., доцент; Ташлыков А.А., к.т.н., доцент
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: yudin_1992@sibmail.com

**FUNDAMENTALS OF RESIDUAL STRESSES DIAGNOSTIC RADIOLOGY
PIPE STEAM BOILERS**Yudin V.A.

Supervisors: Lubimova L.L., Ph.D., associate professor; Tashlykov A.A., Ph.D., associate professor
Tomsk Polytechnic University, 634050, Lenina Avenue, 30, Tomsk, Russia
E-mail: yudin_1992@sibmail.com

Повышение ресурса работоспособности конструкционных материалов паровых котлов может обеспечиваться путем учета перераспределения собственных внутренних структурных напряжений при переменных температурах и деформациях, возникающих в элементах труб в процессе эксплуатации [1, 2, 3, 4]. Существующая масштабная классификация внутренних напряжений позволяет различать внутренние напряжения первого и второго рода [5].

Информация о процессах перераспределения внутризеренных напряжений II рода важна для повышения устойчивости микроструктуры конструкционных материалов, предотвращения межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением. В этой связи цель настоящей работы заключается в обосновании методических положений диагностики остаточных напряжений II рода в оболочках труб паровых котлов.

Напряжения II рода σ_{II} не могут быть определены методами сопротивления материалов и могут быть дифференцированы на основе метода рентгеновской дифракции по физическому уширению профилей рентгеновских линий β [5, 6, 7]. Физическое уширение β определяется совокупным влиянием дисперсности m и микронапряжений n и для двух аналитических линий представляется в виде:

$$\beta_1 = \frac{(m_1 + 2n_1)^2}{m_1 + 4n_1}; \quad \beta_2 = \frac{(m_2 + 2n_2)^2}{m_2 + 4n_2}.$$

Часть истинного физического уширения первой дифракционной линии m_1 связано с дисперсностью D , а часть второй дифракционной линии n_2 – с микронапряжениями II рода зависимостями:

$$D = \frac{0,94\lambda}{m_1 \cos \theta_1}, \quad (1) \quad \sigma_{II} = \left(\frac{n_2}{4 \cdot \operatorname{tg} \theta_2} \right) \cdot E, \quad (2)$$

где θ – угол дифракции; E – модуль нормальной упругости; λ – длина волны; индексы 1 и 2 относятся к первой и второй дифракционным линиям соответственно.

Для экспериментального определения величины n_2 и разделения влияния блочности и микронапряжений на физическое уширение дифракционной линии могут быть применены выражения [8,9]:

$$\frac{m_1}{\beta_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1} + 1} \right), \quad (3) \quad \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\left[0,5 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1} + 1} \right) + \frac{2n_1}{\beta_1} \cdot s \right]^2}{0,5 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1} + 1} \right) + \frac{4n_1}{\beta_1} \cdot s} \quad (4)$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\frac{1}{2r} \cdot \left(1 - \frac{4n_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{8n_2}{\beta_2} + 1}\right) + \frac{4n_2}{\beta_2} \cdot \frac{1}{s}}{\left[\frac{1}{2r} \cdot \left(1 - \frac{4n_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{8n_2}{\beta_2} + 1}\right) + \frac{2n_2}{\beta_2} \cdot \frac{1}{s}\right]^2}, \quad (5)$$

$$\text{где } \frac{m_2}{m_1} = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = r; \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\operatorname{tg} \theta_2}{\operatorname{tg} \theta_1} = s.$$

Согласно (3–5) рассчитываются теоретические значения отношения β_2/β_1 . По экспериментальной величине того же отношения β_2/β_1 определяется величина n_2/β_2 , а по ней, по выражению (2), внутренние микронапряжения второго рода.

На рис. 1 представлены экспериментальные результаты, полученные согласно изложенной методике разделения эффектов дисперсности и микронапряжений для жаропрочной трубной конструкционной стали 12Х1МФ, применяемой в котлостроении для изготовления трубопроводов высокого и сверхвысокого давления, труб пароперегревателей, фланцев, диафрагм.

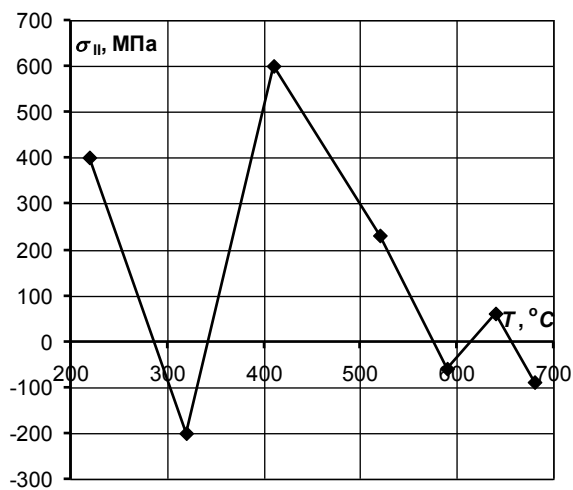


Рис. 1. Изменения микронапряжений II рода в стали 12Х1МФ в зависимости от температуры

Установление характера перераспределения собственных внутренних (остаточных) напряжений в зависимости от температуры (рис. 1) произведено методом термоциклирования в вакуумной приставке УВД-1000 к рентгеновскому аппарату ДРОН.

Согласно рис. 1 установлено:

- собственные внутренние структурные напряжения в процессе термоциклирования претерпевают существенные перераспределения и осциллируют от растягивающих (400, 600, 50 МПа) до сжимающих (200, 50, 100 МПа);
- переход напряжений от растягивающих к сжимающим осуществляется через полную релаксацию напряжений. Релаксация внутренних напряжений наблюдается при температурах порядка 300...350 °C, 575...610 °C и 650 °C.

Выводы

1. Переход внутренних напряжений из зоны сжатия к растяжению явится причиной раскрытия микротрещин, межкристаллитного внутризеренного растрескивания и межкристаллитной коррозии.
2. Релаксация напряжений определяется ослаблением сил межатомных связей и уменьшением сопротивления материала формоизменению от внутренних и внешних давлений в трубных элементах паровых котлов.

3. Уменьшение внутренних напряжений при релаксации связывается с расходом накопленной в предыдущем термоцикле латентной энергии на продвижение структурной трещины.
4. Перераспределение внутренних напряжений в цикле «растяжение – сжатие» в условиях переменных тепловых режимов, при наличии градиентов температур, в переходных режимах работы теплоэнергетического оборудования обусловит накопление повреждаемости с последующим разрушением элементов поверхностей нагрева паровых котлов в результате развития термической усталости конструкционного материала.
5. Выбор оптимальной температуры эксплуатации, при которой исключена релаксация напряжений в условиях фактических градиентов, является физической основой продления ресурса поверхностей нагрева котлов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а в 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уровень внутренних структурных напряжений как показатель работоспособности длительно эксплуатируемого пароперегревателя / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 4. – С. 45 – 48.
2. Учёт внутрискруктурных напряжений в процессах подавления влияния структурной неоднородности на коррозионные повреждения теплообменных труб / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков, А.И. Артамонцев, Б.В. Лебедев, Р.Н. Фисенко // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 62 – 67.
3. Consideration of Intrastructural Stresses in the Processes Connected with the Effect of Structural Nonuniformity on Corrosion Damages Inflicted to HeatTransfer Tubes / L. L. Lyubimova, A. A. Makeev, A. S. Zavorin, A. A. Tashlykov, A. I. Artamontsev, B. V. Lebedev, and R. N. Fisenko // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61. – No. 8. – pp. 600 – 605.
4. Прогнозирование работоспособности труб поверхностей нагрева котлов с учетом внутренних напряжений при пусконаладочных операциях / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. С. 81 – 84.
5. Любимова Л.Л., Заворин А.С., Лебедев Б.В. Основы применения метода высокотемпературной рентгенографии для оценки работоспособности труб паровых котлов // Томск: Изд. STT. – 2009. – 220 с.
6. Методика рентгенометрического анализа внутрискруктурных напряжений /Л.Л. Любимова // Известия Томского политехнического университета.– 2003.– Т. 306.–Вып.4.– С.72 – 77.
7. Применение рентгенометрии в исследованиях структурной неоднородности труб поверхностей нагрева / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков // Тяжелое машиностроение.– 2014.– № 7.– С. 18–22.
8. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.
9. Рентгенография в физическом металловедении / Под ред Ю. А. Багаряцкого. – М.: Гос. науч. – техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1961. – 368 с.